

Marko Puromäki

Induktiivinen lineaarianturi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Automaatiotekniikka

Insinöörityö

09.05.2016

Tekijä Otsikko	Marko Puromäki Induktiivinen lineaarianturi
Sivumäärä Päivämäärä	51 sivua 09.05.2016
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Automaatiotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	
Ohjaaja	Lehtori Timo Tuominen
<p>Insinöörityön tarkoituksena oli kehittää prototyyppi lineaarisesti paikkaa mittaavasta induktiivisesta anturista. Tavoitteena oli käyttää projektin aikana suunniteltua ja kehitettyä prototyyppiä induktiivisen mittaamisen implementaation käytännöllisyyden tarkasteluun. Työssä keskitytään yhden induktiivisen mittaustekniikan toteutukseen, jossa hyödynnetään hyvin paljon nykypäivänä helposti saatavia piirilevyjen valmistuspalveluita.</p> <p>Pääsääntöisesti projektissa kehitettävän induktiivisen anturin kehitysmenetelmänä käytetään kokeellista kehitystapaa. Valittu kehitystapa on perusteltavissa nykyaikana helposti saatavilla olevilla halvoilla prototyypityspalveluilla. Prototyyppi suunnitellaan hyödyntämään piirilevyjen valmistusteknologiaa sekä prosessoivassa osassa että itse antureissa. Projektiin valittu valmistustekniikka mahdollistaa halvat ja mittatarkat prototyyppi, sekä myös massavalmistuksen.</p> <p>Päätarkoituksena prototyypille oli selvittää, voidaanko yksinkertaisessa ja halvassa piirilevyjä hyödyntävässä mittausjärjestelmässä saada aikaiseksi tarpeeksi suuri keskinäisinduktanssi mitattavan kiskon ja sitä mittavaan anturin välille. Mikäli suuri keskinäisinduktanssi saavutetaan, indusoituu mitattavasta kiskosta antureihin jännite, jonka perusteella voidaan selvittää anturin positiosuhteessa.</p> <p>Projektissa suoritettujen testausten perusteella suunnitellun kiskojärjestelmän ja anturijärjestelmän välille ei synny suurta keskinäisinduktanssia. Prototyypin 11 voltin 3 ampeerin pulssitetulla viralla muodostuva sähkömagneettinen kenttä ei muodostanut antureihin mitattavaa jännitettä. Prototyypin todistettiin muuten toimivan sähköisesti täysin suunnitellulla tavalla, täyttäen kaikki sille asetetut vaatimukset.</p> <p>Johtopäätöksenä esitetään, että projektissa toteutettu induktiivinen mittaus ei ole mahdollinen valitulla toteutustavalla. Lisäämällä testilaitteistoon esivahvistus anturien mittasignaaleille olisi mahdollista saada parannettua signaalin voimakkuutta. Projektin johtopäätöksissä kuitenkin huomautetaan yksinkertaisemmista ja helpommin toteutettavissa olevista mittaustavoista, jotka sopivat eritoten harrastelijoiden vaatimuksiin.</p>	
Avainsanat	Induktiivinen, induktio, induktanssi, anturi, mittaus, signaali, kokeellinen kehitys, piirilevy, kisko, epäonnistunut.

Author Title	Marko Puromäki Inductive Linear Position Sensor
Number of Pages Date	51 pages 05/09/2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automation Engineering
Specialisation option	
Instructor	Timo Tuominen, Automation technology lecturer
<p>The purpose of this engineering thesis was to develop a prototype of inductive linear position sensor. Main goal was to use the prototype designed and developed during this project to gauge the functionality of the chosen implementation of inductive measurement. This project mainly focused on developing the prototype for one specific implementation of inductive measurement, which is designed to utilize the printed circuit board manufacturing and prototyping industry.</p> <p>Primarily this project used experimental methods for prototype development and testing the feasibility of prototypes. The chosen method of development can be justified with the availability and low pricing of modern manufacturing methods. The prototype was to be designed around printed circuit board manufacturing both in the processing unit and the sensors. The manufacturing method chosen for this project enables low priced, precise prototypes and also cheap mass manufacturing.</p> <p>The main point of the prototype was to evaluate whether a large enough mutual inductance can be achieved between a track and a sensor element. Induced voltages in multiple sensors could then be used to resolve the position of the sensor relative to the track.</p> <p>Based on the carried out tests, the mutual inductance between the track and a sensor element will stay close to nil. The prototype unit used maximum of 11 volts and 3 amperes of pulsed electricity to generate electromagnetic field around the track, but no induced voltage could be read by the prototype unit. The prototype unit was deemed electrically functional and it fulfilled all the functional requirements.</p> <p>Work done on this project conclusively shows that the chosen implementation inductive position measurement is not feasible. Author proposes using amplification for each sensor element in future testing, but notes that other simpler and easier implementation methods for position measurement exist.</p>	
Keywords	Inductive, induction, inductance, sensor, measurement, signal, experimental development, printed circuit board, track, failed.

Sisällys

Lyhenteet

1 Johdanto	1
1.1 Projektin tarkoitus	1
1.2 Julkinen kehittäminen	1
1.3 Teknologiat lineaarisen paikan mittaamiseen	2
1.3.1 Magneettinen mittaus	2
1.3.2 Optinen mittaus	3
1.3.3 Kapasitiivinen mittaus	4
1.3.4 Induktiivinen mittaus	5
2 Projektin suunnittelu	6
2.1 Induktiivisen mittauksen toteutusperiaate	6
2.2 Piirisuunnittelu	9
2.2.1 Käyttöjännitekytkentä	10
2.2.2 5 V:n jännitelähde	10
2.2.3 Säädetty jännitelähde	11
2.2.4 Kiskon pulssiohjain	12
2.2.5 Kytkimet	13
2.2.6 Anturikytkentä	14
2.2.7 Teensy 3.2 -Mikrokontrollerikehitysjärjestelmä	15
2.3 Piirilevysuunnittelu	16
2.3.1 Anturit	16
2.3.2 Kisko	19
2.4 Ohjelmiston suunnittelu	19
2.5 Osalistaus ja hinnat	19
3 Toteutus	21
3.1 Anturijärjestelmän suunnittelu	21
3.2 Prototyypin valmistus	23
3.3 Kisko ja anturit	23
3.3.1 Toner transfer -metodi	23
3.3.2 Veroboard -metodi	24
3.4 Laitteiston testaus	25
3.5 Mittaustulokset	27

Liite 1. Anturijärjestelmän sähkökaavio

Liite 2. Anturijärjestelmän piirikuva

Liite 3. Anturilevyn kuvat

Liite 4. Anturijärjestelmän osaluettelo

Liite 5. Teensy 3.2 testiohjelmisto

Termistö

Hackaday	Teknologiaharrastajien käyttämä Internet-sivusto, joka sisältää teknologiauutuuksiin ja teknologiaprojekteihin keskittyvän uutisosion, sekä projektiosion, jossa kuka tahansa voi julkaista projektinsa. Sivusto löytyy osoitteista hackaday.com ja hackaday.io.
OpenSSL	Avoimen lähdekoodin C-kielellä tehty toteutus SSL- ja TLS-protokollista.
LVDT	Linear Variable Differential Transformer. Muuntaja, jonka liikuteltava sydänsio aiheuttaa absoluuttiseen poikkeumaan suhteellisen jännitteen laitteen ulostulossa.
DRC	Design Rule Check. Piirilevysuunnitteluohjelmistojen automaattinen ominaisuus, jolla voidaan tarkistaa piirilevyn muuttujia kuten johtimien välinen etäisyys valmistajan minimiarvoja vastaan.
LED	Light emitting diode. Valoa tuottava diodi. Käytetään valaisemiseen ja yleiseen merkinantoon elektroniikassa.
ARM	Advanced RISC Machines. 32-bittinen mikroprosessoriarkkitehtuuri, joka on erittäin suosittu etenkin matkapuhelimeissa ja sulautetuissa järjestelmissä.
Flash	Sähköisesti ohjelmoitava puolijohdemuisti.
RAM	Random Access Memory. Tietokoneen keskusmuisti, johon latautuu suoritettavat sovellukset ja niiden tarvitsevat tiedot.
EEPROM	Electronically Erasable Programmable Read-Only Memory. Puolijohdemuisti, joka toisin kuin RAM säilyttää tietonsa myös käyttövirran kadotessa.
I/O	Input/Output. Rajapinta, jolla voidaan lukea ja asettaa tilatietoa. I/O:sta riippuen kyseessä voi olla digitaalinen tai analoginen toimintatapa.
USB	Universal Serial Bus. Yleinen sarjaväyläarkkitehtuuri, jota käytetään tietokoneiden oheislaitteiden liittämiseen.
CAN	Controller Area Network. Yleisesti ajoneuvoissa, koneissa ja teollisuuslaitteissa käytettävä automaattisarjaväylä.
FIFO	First-In, First-Out. Tietotyyppi josta prosessoidaan tietoa pois samassa järjestyksessä kuin se on sinne asetettu.
I ² C	Sarjamuotoinen, kaksisuuntainen ohjaus- ja tiedonsiirtoväylä.

1 Johdanto

1.1 Projektin tarkoitus

Projektin tarkoituksena on kokeellisesti kehittää prototyyppi lineaarisesta induktiivisesti paikkaa mittavaasta anturista ja selvittää yksinkertaisen induktiivisen mittauksen käyttökelpoisuutta. Suunniteltu käyttötarkoitus anturille on avoimen lähdekoodin laitteistoissa, joissa tuotannon tarkkuutta ja nopeutta voi parantaa huomattavasti paikkatiedon takaisinkytkennällä. Yhteistä näissä avoimen lähdekoodin projekteissa on hyvin usein hinta ja rakenteellinen yksinkertaisuus. Anturi tulee täten suunnitella mahdollisimman halvasti toteutettavaksi. Koska anturin kohdelaitteet vaihtelevat kooltaan huomattavasti, myös mahdollisimman käytännöllisen mittausetäisyyden jatkamisen suunnittelu on kannattavaa.

Idealtaan vastaavia antureita löytyy markkinoilta useita kappaleita, mutta suurin osa niistä on suunnattu teollisuuden käyttötarkoituksiin. Teollisesta käyttötarkoituksesta seuraa anturin hintaa huomattavasti korottavat vaatimukset, vakuudet ja myös yleisesti korkeammat valmistajan katteet.

Suunnittelemalla ja toteuttamalla anturi mahdollisimman halvasti ja eri tilanteisiin mukautuvaksi voidaan kehittää tuote, jonka vastinetta ei avoimen lähdekoodin projekteissa käytettäväksi löydy. Yksinkertaisesta ja halvasta rakenteesta pyritään hyötymään mahdollisimman paljon älykkäällä ohjelmistolla.

1.2 Julkinen kehittäminen

Julkinen kehittäminen ja avoin lähdekoodi tuottaa monia etuja projektille. Projektin kehitysvaiheessa julkisen kehittämisen ansiosta voidaan hyödyntää hyvin laajan ammattilaisten ammattitaitoa. Tärkeää on kuitenkin huomata, että tämän tyyllisessä kehitystavassa ei voida vaikuttaa siihen, kuka projektia kommentoi ja miten. Apua projektille ilmenee vain, mikäli yhteisö näkee projektin idean ja sen etenemällä osoittaman suunnan itselleen tärkeäksi.

Avointa lähdekoodia voi hyödyntää koko projektin kehityskaaren ajan tai, kuten tämän projektin tapauksessa, julkistaa projekti avoimena lähdekoodina sen valmistumisen

jälkeen. Projektin osalta avoimena lähdekoodina julkistamisen etu liittyy yleisen kiinnostuksen luomiseen. Koska projektilla ei ole määrättyä asiakasta, voidaan avoimella lähdekoodilla helpottaa huomattavasti laitteiston adoptiota ennestään tuntemattomille asiakkaille.

Avoimen lähdekoodin projektit myös hyötyvät muiden tekemästä jatkokehitystyöstä, varsinkin mikäli projektista tulee hyvin paljon käytetty. Tästä esimerkkinä OpenSSL projekti, jota hyödynnetään lähes kaikissa puhelimissa, palvelimissa ja yleisesti tietokoneissa. Vuonna 2014 muun muassa HP, IBM, Intel, Oracle, Google ja Cisco keräsivät 3,9 miljoonan dollarin potin avoimen lähdekoodien kehittämiseen, josta suuri osa tulee menemään OpenSSL-projektin kehittämiseen. [1.]

1.3 Teknologiat lineaarisen paikan mittaamiseen

Lineaarisen paikan mittaamiseen on ajan kuluessa kehitetty useita eri menetelmiä. Lyhyen siirtymän mittaamiseen, esimerkiksi hydraulisylintereissä, käytetään yleensä LVDT-anturia. LVDT-anturista saadaan tarkka ja absoluuttinen mittaustieto, mutta rakenteensa seurauksena LVDT-anturista on hankala tehdä pitkiä matkoja mittaavaa laitetta. Lisäksi myös rakenteellisista syistä ei mitattavan alueen mittaa voida muuttaa laitteen rakentamisen jälkeen. [2.]

Koska yksi projektin vaatimuksista on mukautuvuus kohteesta riippuvaiseen mittausetäisyyteen, tarkistellaan alempana lähemmin vain tämän vaatimuksen täyttäviä mittaustekniikoita. Pääsääntöisesti kaikki tekniikat, joilla mittausetäisyyttä voidaan muuttaa, perustuvat jonkinlaiseen siirtymätietoa sisältävän radan lukemiseen.

1.3.1 Magneettinen mittaus

Magneettisen mittauksen pohjana on vaihtuvalla polariteetilla magnetoitu kiskomateriaali. Toinen vaihtoehto valmistusmenetelmäksi on useiden pienien magneettien liimaaminen kiskomateriaaliin. Kiskon magneettikenttää luetaan lukupäässä olevalla HAL-anturilla. Teollisesti valmistettu magneetikisko antaa tarkan mittauksen ja hyvin lineaarisuuden. Pääsääntöisesti magneettisen mittauksen järjestelmät käyttävät inkrementaalista mittaustapaa, jonka ansiosta kiskoa on helppo tehdä rajoittamattomissa mitoissa. [3, s. 3.]

Magneettinen mittaustyyppi kestää hyvin pölyä ja nesteitä, sillä magneettinen mittaustapa ei vaadi fyysistä kosketusta. Kestomagneettiseen kiskoon kuitenkin

metallipöly ja pienet metallipartikkelit tarttuvat tehokkaasti ja voivat aiheuttaa suurissa määrin jumiutumia mittalaitteistossa. Vain ulkoiset tehokkaat magneetit aiheuttavat häiriötä mittaukseen, joten magneettinen mittaustapa on hyvä väline vaativissa olosuhteissa.

Kiskon valmistaminen on todennäköisesti suhteellisen halpaa. Kiskoon menee kuitenkin hyvin suuri määrä kestopagneetteja, jotka estävät hinnan laskemista liian alas. HAL-antureita hyödyntävän kiskoa mittaavan anturipaketin voi toteuttaa erittäin halvalla, sillä kyseiset anturit ovat hyvin yleisiä laite- ja autoteollisuuden ansiosta.

Projektin aikana toteutetuissa Internet-tutkimuksissa ei kuitenkaan löydetty yhtäkään verkkokauppaa, josta magneettista kiskoa tai tarkoitukseen suunniteltuja antureita myytäisiin yksityisille henkilöille. Tämä on teollisuudesta tuttu toimintatapa, jossa laitteistovalmistajien sivuilla pyydetään ostajaa ottamaan yhteyttä projektikohtaisesti laitteiston hinnoittelun sopimista varten. Harmillisesti tämä vaikeuttaa teknologiaharrastajien arkea yksittäisiä ja pienlaitteita suunnitellessa.

Magneettista mittausta ei valittu projektin mittaustyyppiksi, sillä edellä mainitusta syystä magneettisen mittakiskon hankkiminen on hankalaa. Lisäksi tämän projektin aikana ei ole löytynyt tietoa helposta ja halvasta tavasta toteuttaa vastaavanlainen magneetikisko itse.

1.3.2 Optinen mittaus

Optisen mittauksen pohjana on sama perusidea kuin magneettisessäkin mittauksessa. Optisessa mittauksessa kiskomateriaali koostuu kahdesta eri heijastuvuudesta koostuvasta vaihtelevasta kuviosta. Kiskoa mittaava anturi koostuu valonlähteestä ja valolle herkästä anturista. NykYTEknologian ansiosta valonlähteenä käytettävät ledit tai laser-diodit, sekä valoherkät vastukset tai transistorit, ovat erittäin halpoja. Kiskon tarvittava vaihteleva heijastuvuus voidaan yksinkertaisimmillaan toteuttaa mustetulostimella. Kokonaisuudessaan tämän tyyppinen anturi on halpa toteuttaa ja tarvittavat osat ovat helposti saatavilla harrastelijoillakin.

Ongelmaksi optisen mittauksen laitteilla ilmenee pöly, öljyt ja muu anturin sisään joutuva tekijät. Nämä tekijät sekä estävät valonlähteen valoa heijastamasta että mahdollisesti vääristävät signaalia refraktion takia. Mainittujen ongelmien vastapainoksi optinen mittaus ei reagoi magneettisten häiriöiden kanssa. Kunnolla suojattuna

kyisenen menetelmä sopii käytettäväksi sähköisten häiriöiden alueella, esimerkiksi sähkömoottorin yhteydessä. [4, s. 7.]

Optista mittausta ei valittu tämän projektin mittaustyyppiksi pääsääntöisesti sen likaherkkyyden takia. Projektin tarkoituksissa mainitaan mukautuvuus eri mittaustilanteisiin ja mahdollisimman suuri häiriöherkkyys on tärkeä osa tätä päämäärää. Lisäksi optiset mittauslaitteet ovat hyvin yksinkertaisia, sekä ennalta tunnettuja. Insinöörityön mittaisella yhden henkilön tutkimuksella ei todennäköisesti löydetäisi mitään uutta ja merkittävää tämän teknologian saralla.

1.3.3 Kapasitiivinen mittaus

Kapasitiivinen mittaustapa on toimiva ja yleinen mittaustapa elektronisissa työntömitoissa. Työntömitoissa on kapasitiivisella mittauksella saavutettu suuria mittatarkkuuksia ja nopea mittaus. Ongelmia kuitenkin kapasitiivisessa mittauksessa on muutamia.

Työntömittojen kapasitiivinen mittaus perustuu useisiin syövytettyihin piirilevyypintoihin sekä kiskossa että sensorissa. Sensorissa olevat pinnat muodostavat kondensaattoreita kiskossa olevien pintojen kanssa. Kun sensoria liikutetaan, levyjen päällekkäinen pinta-ala muuttuessaan vaikuttaa suoraan muodostuneiden kondensaattorien kapasitanssiin. [5.]

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (1)$$

C on kokonaiskapasitanssi

ϵ_r on eristeen suhteellinen permittiivisyys

ϵ_0 on tyhjiön permittiivisyys

A on kondensaattorin levyjen pinta-ala

d on kondensaattorin levyjen välinen etäisyys.

Kaavan 1 perusteella ongelmaksi muodostuu levyjen pinta-ala, etäisyys toisistaan ja välimateriaalin suhteellinen dielektrisyyskerroin. Jotta mittaustarkkuus saadaan tarvittavan hyvälle tasolle, tulee kondensaattorin toisena levynä toimivia pintoja olla hyvin lyhyin välimatkoin. Tämä rajoittaa levyjen pinta-alan pieneksi, jonka seurauksena mittalaitteiston pitää olla hyvin herkkä, jotta pientä kapasitanssia voidaan mitata efektiivisesti.

Tärkeätä kapasitiivisessa mittauksessa on myös pitää levyjen etäisyys mahdollisimman pienenä, sekä vakiona koko mittausetäisyydeltä. Etäisyyttä tärkeämmäksi ongelmaksi muodostuu kuitenkin kaavassa 1 mainittu välimateriaalin suhteellinen dielektrisyyskerroin. Mikäli levyjen välissä oleva aine muuttuu, muuttuu olennaisesti myös anturin toiminta. Tästä syystä kaupalliset kapasitiiviset anturit ovat erittäin tarkkaan suojattu muun muassa nesteiltä. [5.]

Kapasitiivista mittaustapaa ei valittu projektin mittaustyyppiksi edellä mainittujen ongelmien takia.

1.3.4 Induktiivinen mittaus

Induktiivinen mittaustapa on projektiin valittu mittaustapa. Induktiivisessa mittauksessa hyödynnetään aktiivista kiskoa, jossa virtaava sähkövirta muodostaa sähkömagneettisen kentän ja indusoi jännitteen kiskoaa mittaavaan anturiin.

Etuna muihin mittaustapoihin on häiriökestävyys. Anturin valmistaminen ei ole yhtä halpaa kuin optisessa mittauksessa, mutta piirilevyteknologialla ja massatuotannolla hinta on mahdollista saada hyvinkin alas.

Koska induktiivisessa mittauksessa aktiivisesti hallitaan sekä kiskoa että sitä lukevia antureita, voidaan ohjelmistolla toteuttaa monia metodeja esimerkiksi tarkkuuden ja häiriökestävyyden parantamiseen.

2 Projektin suunnittelu

Projektin alussa toteutetussa suunnitteluosuudessa keskityttiin lähinnä sähköiseen suunnitteluun, jonka perusteella toteutettavalla prototyyppilaitteella voidaan kokeellisesti selvittää valitunlaisen induktiivisen lineaaripaikkamittauksen käytännöllisyyttä. Sähkömagnetismi ja induktiiviset laskut ovat hyvin monimutkaisia, minkä seurauksena projektin lähestymistavaksi on valittu kokeellinen lähestymistapa.

2.1 Induktiivisen mittauksen toteutusperiaate

Induktiivinen mittaus tullaan toteuttamaan aktiivisella kiskolla, joka pysyy staattisena mitattavassa kohteessa, sekä prosessointiyksikköön kytketyillä antureilla jotka tunnistavat paikkansa kiskolta.

Yksi toteutustapa induktiiviselle mittaukselle olisi käyttää useita hall-antureita signaalin lukemiseen. Tässä projektissa kuitenkin yritetään kehittää sekä anturit että kisko täysin piirilevymateriaalista. Todennäköisin ongelma tulee olemaan tarpeeksi tehokkaan signaalin luonti ja sen onnistunut mittaus. Toisin kuin yleisesti käytetyt hall-anturit, ei kiskon ja piirilevystä valmistettujen anturien välille välttämättä tule tarpeeksi suurta signaalia mitattavaksi.

Prosessointiyksikkö kytkee kiskolle menevää jännitettä päälle/pois periaatteella suurella taajuudella. Tämä sähkövirran määrän vaihtelu aiheuttaa sähkömagneettisen kentän kiskon johtimien ympärille.

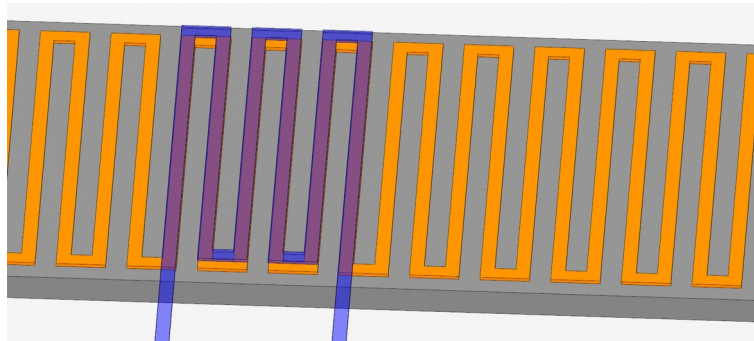
$$E_{ind} = \frac{-\Delta \Phi_M}{\Delta t} \quad (2)$$

E_{ind} on indusoitunut jännite

Loppuosa kokonaisuudessaan on magneettivuon muutos ajan suhteen.

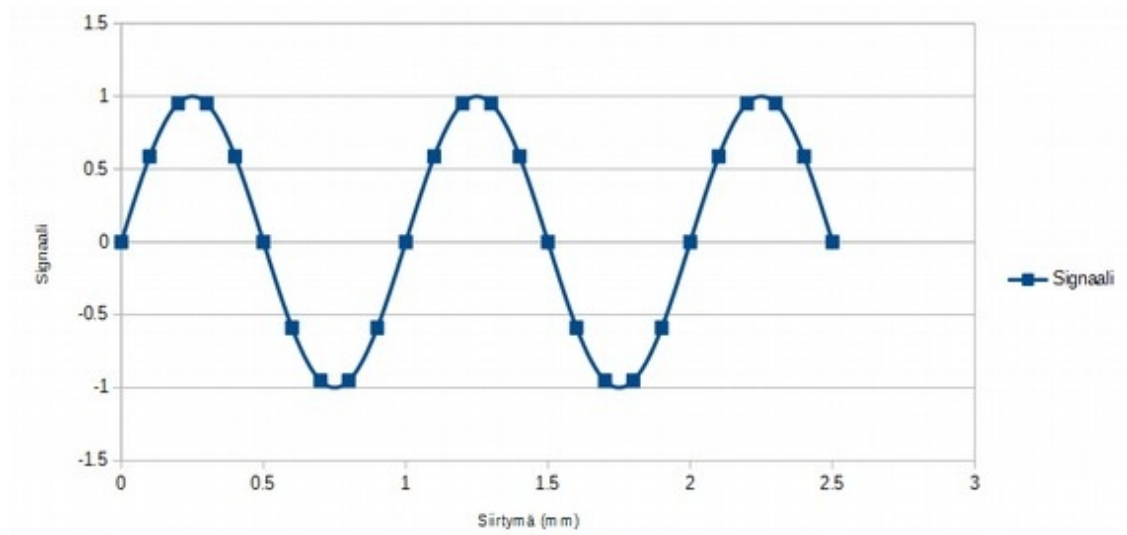
Faradayn induktiolaki (kaava 2) osoittaa, että indusoituneen jännitteen määrä on suoraan suhteellinen magneettivuon muutoksen määrään ajan suhteen. Pulssitettu jännite kiskossa täten tuottaa sähkömagneettisen kentän, jonka muutos on mitattavissa.

Muuttuva sähkömagneettinen kenttä yhdistetään kiskossa olevan johtimen muotoon, saadaan anturoitava kokonaisuus josta on mahdollista laskea liike. Paikkaa kiskosta lasketaan usealla anturilla, joissa on vastaava mekaaninen kuvio kuin kiskossa. Antureita tulee olla useita, joista osa on eri vaiheessa, jotta voidaan siirtymän määrän lisäksi saada selville suunta. Lisäksi useammalla anturilla voidaan toteuttaa Noonioasteikko. Tällaisella järjestelyllä saadaan myös anturijärjestelmän kokonaistarkkuus suuremmaksi kuin mitattavan kiskon kuvion koko.



Kuva 1: Anturin ja kiskon suunnittelukuva, johon on sinisellä merkitty anturi ja keltaisella kiskon sähköä johtava osa.

Yllä olevassa kuvassa (kuva 1) on esiteltynä yksi anturi ja osa kiskoa, josta paikka mitataan. Anturiin ja kiskoon muodostetaan kuvio kuvan esittämällä tavalla. Anturin ollessa täysin kiskon kuvion päällä on anturiin indusoituva jännite suurimmillaan. Anturin siirtyessä sivummalle vaihtelee indusoitunut jännite maksimaalisen positiivisen jännitteen ja maksimaalisen negatiivisen jännitteen välillä (kuva 2).



Kuva 2: Yhden anturielementin simuloitu signaalin amplitudi suhteessa siirtymään kiskolla.

Anturissa on täysin sama kuvio kuin kiskossa, jotta saadaan aikaiseksi mahdollisimman hyvä keskinäisinduktanssi anturin ja kiskon välille. Keskinäisinduktanssi (kaavat 3 ja 4) on sähkömagneetiikan suure, jolla ilmaistaan kahden johtimen välistä vuorovaikutusta. Maksimoimalla anturin ja kiskon välinen keskinäisinduktanssi saavutetaan mahdollisimman hyvä signaali-kohinasuhde. Keskinäisinduktanssin vakio M on summa kahden johtimen välillä vaikuttavista geometrisista tekijöistä. Kelojen toisiinsa indusoimat jännitteet riippuvat tästä muototekijästä ja Faradayn induktiolain mukaisesti virran muutosnopeudesta.

$$M = \frac{N_B \Phi_B}{I_A} = \frac{N_A \Phi_A}{I_B} \quad (3)$$

Alaindeksit A ja B viittaavat ensiö- ja toisiokeloihin

M on keskinäisinduktanssin vakio

N_x on kelan kierrosten määrä

Φ_x on kelan aiheuttama magneettivuo

I_x on kelan läpi kulkeva virta.

$$U_B = -M \frac{\Delta I_A}{\Delta t} \quad (4)$$

U_B on toisiokelaan indusoitunut jännite

M on kelojen välisten keskinäisinduktanssin vakio

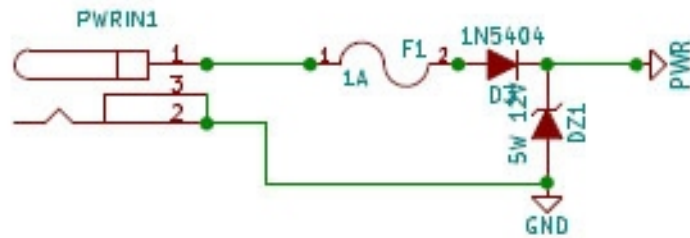
ΔI_A on ensiökelan läpi menevän virran muutos

Δt on virran muutoksen aikaväli

2.2 Piirisuunnittelu

Projektin toteutustavan selvittämisen jälkeen jaettiin se osiin sähköisten toimintojen perusteella ja näistä muodostettiin anturijärjestelmän sähkökaavio (liite 1). Seuraavissa luvuissa selvitetään toiminnoittain järjestelmän eri osien vaatimukset ja ratkaisut näihin vaatimuksiin. Kaikille osille yhteisiä vaatimuksia oli myös käyttää mahdollisimman vähän erilaisia sähköisiä osia, sekä suunnitella järjestelmä yleisten ja helposti saatavilla olevien osien ympärille.

2.2.1 Käyttöjännitekytkentä

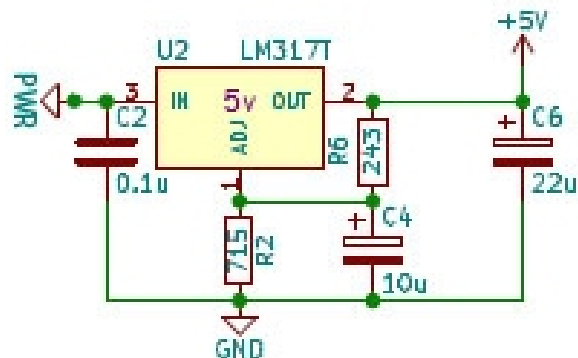


Kuva 3: Käyttöjännitekytkennän piirikaavio.

Käyttöjännitekytkennällä on kaksi vaatimusta. Sen tulee tarjota liityntä ulkoiselle virtälähteelle, sekä suojata loppua laitteistosta virheellistä kytkentää vastaan:

- Oikosulkua vastaan suojataan 1 ampeerin sulakkeella.
- Väärin kytkettyä virtälähdettä ja väärää polariteettia vastaan suojataan diodilla.
- Ylijännitettä vastaan suojataan 12 voltin zener-diodilla.

2.2.2 5 V:n jännitelähde



Kuva 4: 5 V:n jännitelähteen piirikaavio.

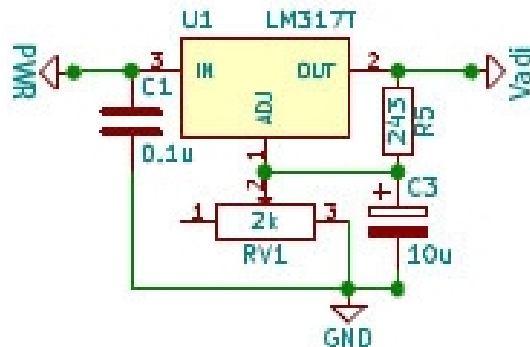
Sisääntuleva 7 – 12 voltin välillä oleva jännite täytyy reguloida 5 V:n jännitteeseen Teensy 3.2 -mikrokontrollerijärjestelmää varten. Regulointiin käytetään hyvin yleistä LM317T säädettävää jänniteregulaattoria. Regulaattorin tukipiirit ja ulostulojännite suunniteltiin STMicroelectronicsin LM317 teknisen ohjeen perusteella [6, s. 10].

LM317 ulostulojännite saadaan laskettua seuraavalla kaavalla [6, s. 10]:

$$V_O = V_{REF} \left(1 + R_2 / R_1 \right) + I_{ADJ} R_2 \quad (5)$$

Jossa V_0 tarkoittaa ulostulevaa jännitettä, V_{REF} LM317 sisäistä 1,25 voltin referenssijännitettä, R_1 ja R_2 jännitteenajakan vastuksia ja I_{ADJ} LM317 säätöpinnin virtaa. I_{ADJ} on määritelty LM317 teknisessä ohjeessa.

2.2.3 Säädetty jännitelähde

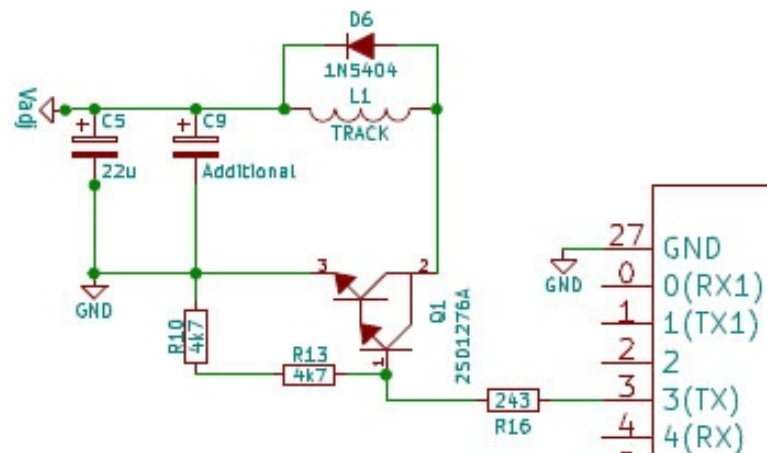


Kuva 5: Säädetty jännitelähteen piirikaavio.

Säädetty jännitelähde muodostaa kiskon läpi ajettavan jännitteen, jolla luodaan sähkömagneettinen kenttä antureiden luettavaksi. Koska kiskon läpi ajettava virta on hyvin nopeasti pulssitettavaa, ei virtaregulaattori välttämättä toimisi kunnolla. Tästä syystä jännitelähteellä ladataan kondensaattori, josta muodostetaan kiskon virta. Virran määrä muodostuu kondensaattorin jännitteestä, sisäisestä resistanssista ja kiskon kokonaisresistanssista. Säädetty jännitelähde ei välttämättä ole paras mahdollinen ratkaisu, mutta ehdottomasti helpoiten toteutettava. Lisäksi se mahdollistaa erilaisten signaali-kohinasuhteiden analysoinnin testilaitteella. Säädyn ansiosta on myös mahdollista käyttää etukäteen tuntematonta määrää kiskoja sarjaan kytkettynä anturilaitteessa.

Säädetty jännitelähde suunniteltiin täysin samalla periaatteella kuin 5 V:n jännitelähde, mutta vastuksen R_2 tilalle valittiin säädetty vastus, jotta säädetty jännitelähteellä voidaan suoraan vaikuttaa kiskon läpi kulkevaan tehoon ja täten myös koko anturijärjestelmän kohina-signaalisuhteeseen.

2.2.4 Kiskon pulssiohjain

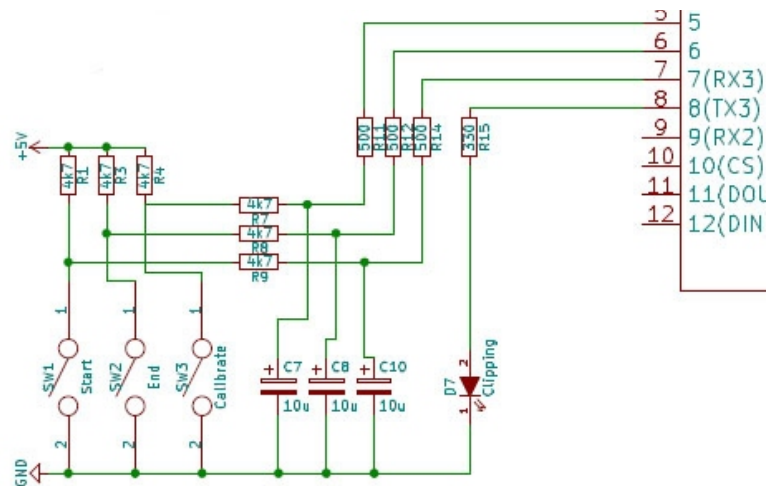


Kuva 6: Kiskon pulssiohjaimen piirikaavio.

Kiskon läpi kulkevan virran kytkemiseen käytetään darlington-paria 2501276A. Kondensaattorit C5 ja C6 ovat säädettävällä jännitelähteellä ladattavat kondensaattorit. Diodi D6 on kytkettynä estosuuntaan kiskon napojen ylitse suojaamaan mahdollisilta induktiivisilta virtapiikeiltä kiskon kokonaisinduktanssin muuttuessa kun anturia liikutetaan. Vastukset R10 ja R13 toimivat yhdessä noin 10 kilo-ohmin alasvetovastuksena, jolla varmistetaan Darlington-parin sulkeutuminen ohjaussignaalin loppuessa.

Vastus R16 toimii darlington-parin etuvastuksena, jolla rajoitetaan tämän ottama virta Teensy 3.2 -mikrokontrollerin sallimalle rajalle. Teensyn 3.3 V:n ulostulojännitteellä 243 Ω :n vastus rajoittaa virran noin 14 milliampeeriin ohmin lain mukaisesti, joka on selvästi alle Teensy 3.2 sallitun 25 mA porttikohtaisen virtamäärän [7, Viesti #2].

2.2.5 Kytkimet



Kuva 7: Laitteiston kytkimet ja merkinantoledi.

Laitteistoon on kytketty rajakytkimet, kalibroitipainike ja led-valo. Kaikki kytkimet sisältävät maksimivirtaa rajoittavat vastukset, sekä kondensaattorista ja vastuksesta muodostetun alipäästösuotimen. Alipäästösuotimen tehtävä on suodattaa mikrokontrollerille menevää signaalia siten, että kytkimen kytkeytymisestä johtuva korkeataajuuksinen vaihteleva signaali ei pääse vaikuttamaan mitattavaan arvoon. Alipäästösuotimet ovat mitoitettu kaavalla 6 siten, että aikavakioksi muodostuu noin 43 millisekuntia. Suotimen kondensaattorien arvot laskettiin lähtöjännitteellä 5 V ja päättymisjännitteellä 2 V. 43 millisekuntia on tarpeeksi suodattamaan suurimmat häiriöpiikit pois kytkinten kytkeytymisestä. [8, s. 3.]

$$V_f = V_i e^{(-t/RC)} \quad (6)$$

V_f on päättymisjännite

V_i on aloitusjännite

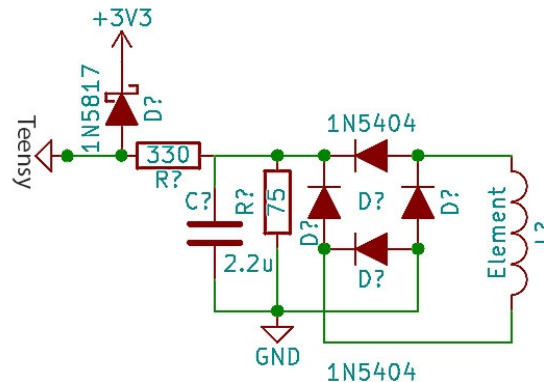
t on aika

R on alipäästösuotimessa käytetyn vastuksen arvo

C on alipäästösuotimessa käytetyn kondensaattorin kapasitanssin arvo.

Led-valon tehtävänä on ilmoittaa käyttäjää liian voimakkaasta signaalista laitteen suojelemiseksi. Ledin eteen on kytketty virtaa rajoittava etuvastus.

2.2.6 Anturikytkentä



Kuva 8: Yhden anturin anturipiirikaavio.

Kuvan 8 mukaan näkyviä piirejä on lopullisessa piirilevyssä toteutettu viisi kappaletta. Jokaisen anturipiirin tehtävänä on lukea anturielementtiin muodostunut jännite, tasasuunnata ja suodattaa se ja lopulta ohjata kyseinen jännitesignaali suojaelementtien lävitse mikrokontrollerille luettavaksi.

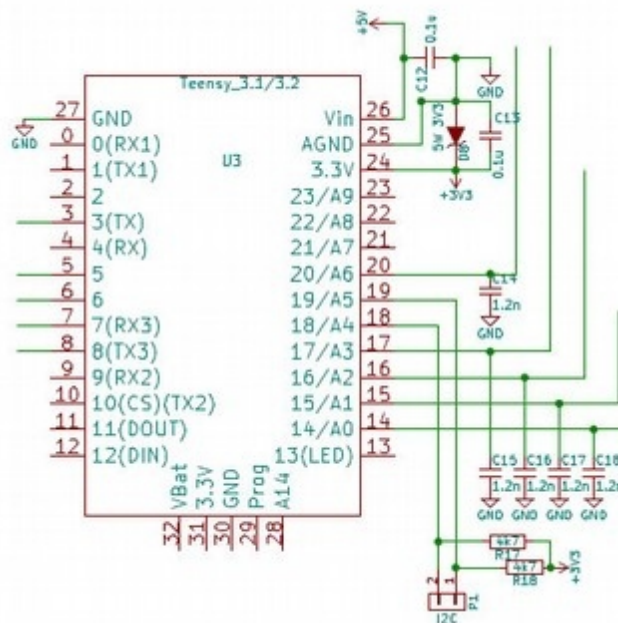
Anturielementtiä kuvataan kaavassa induktorilla "Element". Anturielementtiin kytketyt neljä diodia ovat tasasuuntauskytkennässä, jonka tarkoitus on muokata sisääntulevaa signaalia Teensylle sopivaksi. Suurin rajoitus tulee Teensyn käyttämän ARM-mikrokontrollerin ADC-muuntimista, jotka pystyvät lukemaan vain maapotentiaalia suurempia jännitteitä [9, s. 36, 37]. Tasasuuntauksella tuodaan kaikki jännitteet maapotentiaalin positiiviselle puolelle, ilman että signaaliin juurikaan vaikutetaan. Jokaisella diodilla on kynnyksjännite, jonka ylittyessä diodi alkaa johtamaan sähköä kunnolla. Elementistä tuleva signaali kulkee sekä positiivisella että negatiivisella

signaalin jaksolla kahden tasasuuntausdiodin lävitse. Täten diodit vähentävät mitattavan määrän sisääntulevan signaalin amplitudia. Tästä johtuva pienimuotoinen häviö voidaan kuitenkin mitätöidä säätämällä kiskon läpi kulkevaa virtaa suuremmaksi, osoittaen säädettävän jännitelähteen tärkeyden.

Seuraavana kaavassa näkyvä vastus ja kondensaattori muodostavat sekä kuorman anturista tulevalle jännitteelle että tasoittavat kiskon läpi menevää korkeataajuista pulssitusta.

Signaalin kanssa sarjassa oleva vastus ja siitä +3,3 Voltin kiskoon yhdistyvä Schottky-diodi muodostavat mikrokontrollerin suojaapiirin. Sarjavastuksella rajoitetaan laitteelle pääsevää maksimivirtaa, kun taas diodilla estetään jännitteen nousu liian suureksi.

2.2.7 Teensy 3.2 -Mikrokontrollerikehitysjärjestelmä



Kuva 9: Teensy 3.2 piirikaavio

Teensy 3.2 on amerikkalaisen yrityksen, PJRC:n, valmistama ARM-prosessoriin perustuva mikrokontrolleri. Teensy on tarkoitettu käytettäväksi harrastelijaprojekteissa, joissa laskentateho, laadukkaat kirjastot ja matala 20 U.S. dollarin hinta kohtaavat. Teensy 3.2 käyttää 96 Mhz:n kellotaajuudella ARM Cortex-M4 -prosessoria, joka sisältää kaiken tarvittavan. Tärkeimmät ominaisuudet ovat suuri muistin määrä, Flash 256 kilotavua, RAM 64 kilotavua ja EEPROM 2 kilotavua, 34 kappaletta digitaalisia

I/O:ita, 21 analogista tuloa sekä 1 analoginen lähtö 12 bitin tarkkuudella. Lisäksi Teensystä löytyy USB, CAN ja sarjaväylät, sekä 8 FIFO-puskuria.

Teensy 3.2 on täysin itsensä tukeva laite, joka ei USB-virtaan kytkettynä tarvitse yhtäkään ulkopuolista komponenttia toimiakseen. Tämän laitekokonaisuuden yhteydessä Teensy on kuitenkin kytketty 5 V:n jännitelähteeseen ja antureihin. Lisäksi kuvassa näkyy I2C-väylän liitäntä, jonka tarkoituksena olisi sallia yksinkertainen sarjayhteys mittadatan esittämiseksi.

Teensyn pinneihin 14...17 ja 20 on kytketty 1.2 nanofaradin keraamiset kondensaattorit parantamaan anturien analogisen mittauksen laatua. ARM-prosessorin ADC-muunnos voi mittauksen aikana viedä suuren määrän virtaa sen sisäisten mittauskondensaattorien latautuessa, jolloin valmistajan ohjeesta on suositeltavaa lisätä kyseiset kondensaattorit. [9, s. 37.]

Lopuksi vielä sekä 5 V:n, että 3,3 V:n liitäntöihin on lisätty kondensaattorit tasaamaan syöttövirran jännitettä. 3,3 V:n pinniin kytkettynä on myös 3,3 V zener-diodi, jolla suojataan 3,3 V:n jännitelinjan jännitteen nousu yli 3,3 voltin jännitteen.

2.3 Piirilevysuunnittelu

Piirisuunnittelun jälkeen tehtävän piirilevysuunnittelun tarkoituksena on siirtää laitteiston sähköinen suunnitelma toteutettavaan muotoon. Piirilevysuunnittelussa laitteiston osat asetetaan piirilevysuunnitelmalle ja kiinnitetään toisiinsa johtimilla. Piirilevysuunnittelulla saatiin aikaiseksi tiedostot, joiden perusteella kolmannen osapuolen piirilevyvalmistaja voi valmistaa juuri halutunlaiset piirilevyt.

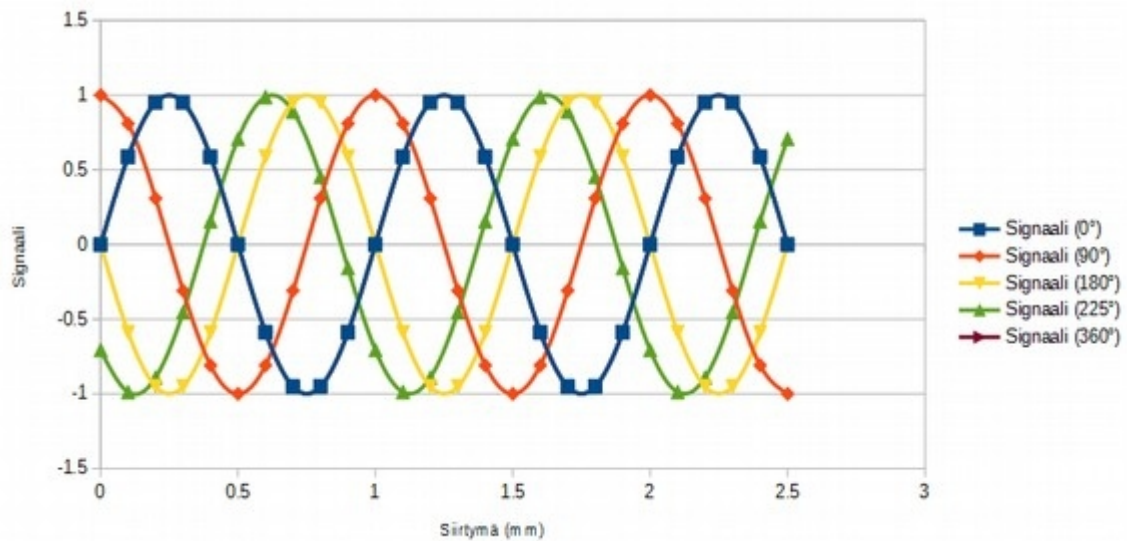
Piirilevysuunnittelun pohjalta valmistui projektiin Liitteessä 2 näkyvä piirilevy.

2.3.1 Anturit

Anturit tulee suunnitella siten, että jokainen yksittäinen anturin elementti muodostuu osasta samaa kuviota, minkä läpi sähkövirta ajetaan kiskossa. Kuvion täytyy olla myös sellainen, että kiskon suuntaisella siirtymällä indusoituneen virran määrä vaihtelee mitattavalla tavalla. Näiden vaatimusten perusteella on päädytty kuvan 1 mukaiseen rakenteeseen.

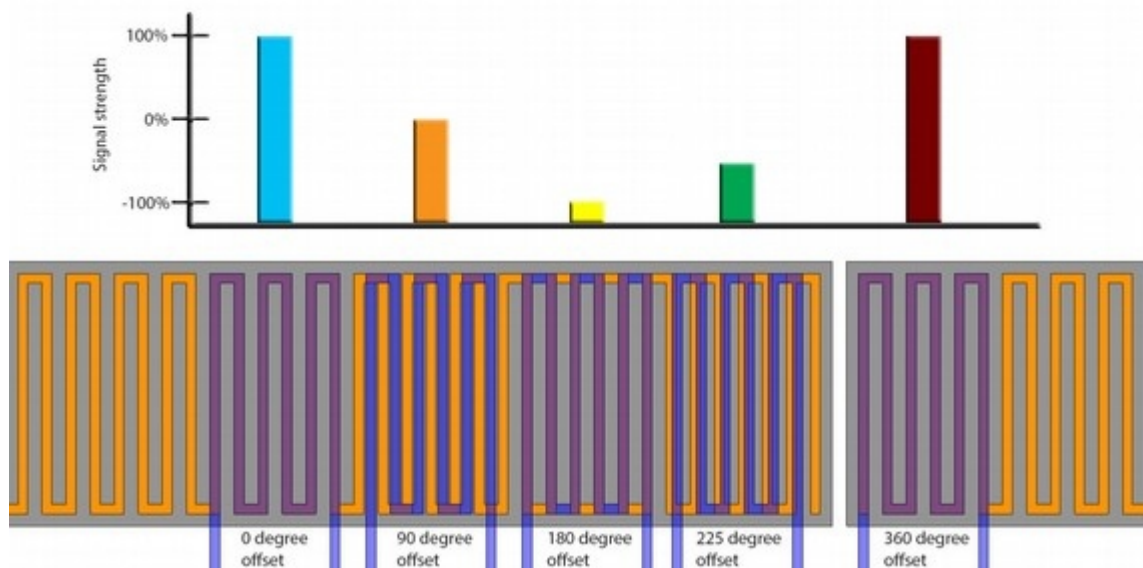
Päädytty rakenne vaatii kaksi tai useampaa anturielementtiä eri vaiheissa paikan suhteen, jotta olisi mahdollista selvittää anturin liikkumissuunta. Lisäksi usealla eri

vaiheessa olevalla anturilla voidaan hyödyntää työntömitoista tuttua noonio-asteikkoa, jolla saadaan mittaustarkkuutta parannettua. Mittaustarkkuutta voidaan myös lisäksi vielä parantaa ottamalla huomioon antureiden analogisuus, tarkoittaen systemaattisesti laskevaa anturikohtaista mittausjännitettä kun optimipaikasta siirrytään sivuun. Optimipaikalla tarkoitetaan tässä tapauksessa anturin paikkaa, jossa mitattava signaali on suurimmillaan. Käytännössä se tarkoittaa tilannetta, jossa tämän tyyppinen anturi on vaiheessa tai vasta-vaiheessa kiskoon nähden. (kuva 10)



Kuva 10: Viiden vaihe-eroilla olevien anturielementtien simuloitunut mitatut signaalin amplitudit suhteessa siirtymään kiskolla.

Kun anturin päädyissä olevat anturielementit asetetaan samaan vaiheeseen, voidaan ohjelmistolla mahdollistaa siirtyminen yhdeltä mitattavalta kiskolta toiselle. Lisäksi ensimmäisten anturien tarkalla paikkatiedolla ja viimeisen anturin tiedolla uuden kiskon alkamisesta voidaan toteuttaa tarkka automaattinen kalibrointi kiskojen välille (kuva 11). Tämä on tärkeä ominaisuus, jolla voidaan huomattavasti parantaa isomman laitteiston kokonaistarkkuutta ja madaltaa asennuskustannuksia.



Kuva 11: Viisi vaihesiirrossa olevaa anturia kahden eri kiskon välillä ja niiden simuloitunut mitta-arvot.

2.3.2 Kisko

Kiskolla on vain kaksi vaatimusta. Kiskon tulee olla mittatarkka, jotta siitä voidaan laskea paikkatieto riittävällä tarkkuudella, lisäksi kiskon tulee olla mahdollisimman yksinkertainen ja helppo valmistaa. Käytännössä kisko on hyödyllistä toteuttaa piirilevyvalmistusteknologialla siten, että ne voidaan helposti juottaa toisiinsa pidemmän kiskon luomiseksi. Kiskon rakenne näkyy kuvassa 11.

Käytännössä tämän projektin aika- ja rahoitusrajoitteiden takia kisko toteutettiin Veroboard-levystä (kuva 13). Veroboard-levyn käyttämisen etuna on jo lähes valmis kiskorakenne, joka vaatii vain pieniä juotostöitä kiskon valmistamiseksi. Lisäksi veroboard-piirilevyt ovat erittäin mittatarkkoja, eivätkä liian kalliita.

2.4 Ohjelmiston suunnittelu

Projektin aikarajoitteiden seurauksena ohjelmisto suunnitellaan yksinkertaiseksi ja vain toteuttamaan halutut testit. Teensy 3.2 -mikrokontrolleri ohjelmoidaan C-kielellä hyödyntäen TeensyLoader-ohjelmointiohjelmistoa. Tiedon keruu ja prosessointi tietokoneella toteutetaan yksinkertaisilla Python-ohjelmilla. Tiedonsiirto Teensyn ja tietokoneen välillä tapahtuu USB-sarjayhteyden yli.

Automaattinen kalibrointi ja kiskon tunnistaminen

Anturin toteutusmetodi estää tekemästä kunnollista automaattista kalibrointia ja toisen kiskon tunnistamista. Mikrokontrollerilla mitatun datan perusteella voidaan kuitenkin luoda simulaatio näistä toiminnoista.

2.5 Osalistaus ja hinnat

Laitteiston osalistaus löytyy liitteestä 4.

Hinnan alentaminen

Projektissa suunnitellun laitteen hinnan alentaminen on mahdollista perinteisin massatuotannon menetelmin. Vaihtamalla täysin pintaliitoskomponentteihin saadaan kaikista osista ja piirilevyistä tehtyä pienempiä. Pienemmät osat ja piirilevyt parantaa sekä mittaustarkkuutta, että pienentää hintaa. Tiheämmällä kiskolla saadaan parempi mittaustarkkuus, mutta se ei ole välttämättä haluttavaa. Mitä tiheämpi kiskon kuvio on, sitä hitaampi on suurin nopeus missö mittausta vielä onnistuu.

Lisäksi siirtymällä massatuotantoon yksittäiskappaleiden sijasta voidaan laitteiston kappalehintaa laskea huomattavasti. Hyödyntämällä yleisiä pintaliitoskomponentteja sekä tilaamalla suuria määriä voidaan laskea tuotteen hintaa. Mahdollisesti kannattaisi myös harkita kiskon virtalähteen ja ohjauspiirin siirtämistä erilliselle levyille, jotta voidaan ohjata useita kiskoja yhdestä pisteestä. Tässä tapauksessa itse anturointi ja prosessointilevy olisi halvempi ja myöskin usean erillisen mitattavan kiskon järjestelmät olisivat halvempia.

Lisäksi tarvittaessa on mahdollista siirtyä käyttämään huonompilaatuisia osia ja paikata tätä tehokkailla ohjelmistomenetelmillä, kuten statistiikka-analyysillä anturidatasta.

3 Toteutus

Ensimmäisten käsin piirrettyjen suunnittelukuvien ja anturin perusidean valmistettua aloitettiin projektilogin pitäminen Hackaday.io-sivustolla. Perusteluna tälle päätökselle oli aikaisemmat toivomukset toteuttaa projekti julkisen kehityksen alaisuudessa ja se, että Hackady on yksi tunnetuimmista teknologiaharrastelijoiden sivustoista. Projektilogiin päätettiin suunnitteludokumentaatioiden jälkeen päivittää vain suurimmat edistysaskeleet projektissa, sekä tarvittaessa lisäksi vastata yhteisöltä saatuihin kysymyksiin. Projektin aikana yhteisön osallistuminen projektin kehitykseen oli vähäistä. Yksi suuri vaikuttava tekijä osallistumisen vähyyteen oli myös päivitysten vähäinen määrä ja projektin hidas etenemistahti suunnitteluosuuden jälkeen. Suurimmat aiheuttajat näille tekijöille oli henkilökohtaiset ja palkkatyöhön liittyvät syyt. Projektin etenemistä pidettiin toissijaisena, sillä yhtä määrättyä asiakasta sen kehitykselle ei ollut.

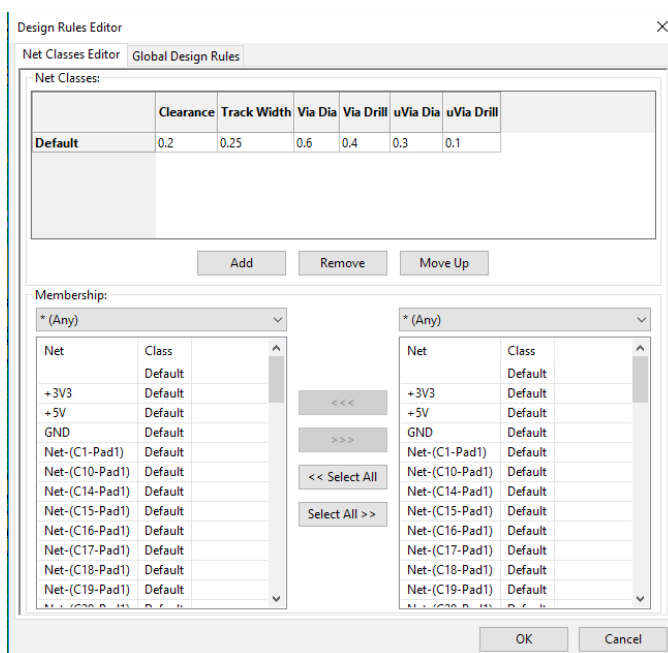
3.1 Anturijärjestelmän suunnittelu

Virtapiirin suunnittelu anturille osoittautui hieman odotettua suuremmaksi haasteeksi. Ohjelmistoksi suunnittelemista varten valittiin Kicad, avoimen lähdekoodin sähkölaitteiden suunnitteluohjelmisto. Ensimmäinen viikko ajasta meni vain Kicad-ohjelmiston opiskeluun, kun taas seuraava kuukausi virtapiirin eri iteraatioiden valmisteluun. Hackaday.io-yhteisön henkilö, K.C Lee, osoittautui tärkeäksi avuksi tässä vaiheessa, huomauttaen jo alkumetreillä muutamista todennäköisistä suunnitteluvirheistä.

Virtapiirin suunnitelman valmistuttua (liite 2) alkoi projektin työläin vaihe, piirilevysuunnittelu. Piirilevysuunnittelulla oli tarkoitus toteuttaa kaksi tärkeätä tavoitetta: piirilevyn tuli olla mahdollisimman pieni ja piirilevyn tuli pelkästään käyttää levyn läpi juotettavia komponentteja. Harmillisesti nämä kaksi päämäärää ovat suoranaisesti kiistassa toistensa kanssa. Hyvin paljon tilatun piirilevyn hintaan vaikuttavan piirilevyn koon saisi mahdollisimman pieneksi hyödyntämällä erittäin pieniä pintaliitoskomponentteja. Käytettävissä oleva laitteisto ei kuitenkaan olisi pystynyt pintaliitoslevyn juottamiseen, joten suunnittelussa jouduttiin tyytymään levyn läpi juotettaviin komponentteihin. Päätös käyttää tällaisia komponentteja nosti laitteiston komponenttien hintaa, piirilevyn hintaa ja koko laitteiston kokoa.

Toimintaperiaatteeseen ja mittaustapaan se ei kuitenkaan vaikuta, joten prototyyppilaitteistolle tämä oli siedettävä kompromissiratkaisu.

Suunnitteluperiaatteet piirilevysuunnittelussa oli hyvinkin yksinkertaiset. Kaikki johtimet tulee kytkeä ohjelmistossa käsin, sillä automaattinen johdotus tuottaa yleensä ongelmallisia tuloksia. Osat tulee sijoittaa loogisiin osakokonaisuuksiin levyille, mahdollisimman lähelle toisiaan. Lopuksi niin pitkään kuin mahdollista, tulee pysyä levyn pintapuolella. Kun levyn suunnittelee pääsääntöisesti yksipuoliseksi, voidaan toisen puolen levy täyttää lähes kokonaan kuparilla. Tämä pohjapuolen kuparipinta toimii laajana maajohtimena, joka myös suojaa laitetta hieman häiriöiltä. Lisäksi suunnittelussa tulee aina noudattaa valmistajan minimivaatimuksia johtimien paksuuksille, reikien halkaisijoille ja vastaaville muuttujille. Nämä muuttujat onneksi voidaan syöttää Kicad-ohjelmistoon automaattista suunnittelusääntöjen tarkistusta varten (DRC).



Kuva 12: Projektissa käytetyt Kicad DRC asetukset

Valmistajaksi prototyyppilevyille valittiin amerikkalainen OSH Park, sillä kyseisen yrityksen palvelusta oli minulla kokemusta jo ennaltaan. Tilatut piirilevyt saapuivat kolmen viikon sisällä tilauksesta (Liite 3, sivu 1). OSH Parkilta lisäksi tilasin samalla Teensy 3.2 -mikrokontrollerin toimimaan laitteiston prosessointiyksikkönä.

3.2 Prototyypin valmistus

Piirilevyjen saavuttua oli seuraava tehtävä koota prototyyppilaitteisto. Laitteiston komponentit tilattiin Partco Oyltä. Osaluettelo kaikista tilatuista komponenteista löytyy liitteestä 4. Yhtä prototyyppiä varten tilattaessa komponenttien lukumäärät pysyvät niin pieninä, että prototyyppilaitteesta tulee kallis verrattuna todennäköiseen teollisen tuotannon versioon.

Prototyyppilaitteen valmistus itsessään oli hyvin yksinkertainen prosessi, vaatien vain osien juottamisen paikalleen sähkö- ja piirikaavioiden mukaisesti. Tuotantolaitokselta tullessa piirilevyssä havaittiin kaksi ongelmaa (Liite 3, sivu 2), jotka jouduttiin ratkaisuksi kiertämään aikarajoitteiden vuoksi. Ongelmaksi muodostuivat virtaliittimen ja säädettävän virtalähteen säädettävän vastuksen reikien määrittelyt. Virtaliittimen reikien tulisi olla koneistettu soikean muotoiseksi, mutta piirilevyssä oli vain reikä tämän koneistusreitien alkupisteessä. Säädettävän virtalähteen reiät olivat itse komponentin jalkojen halkaisijaa pienemmät, mikä todennäköisesti johtui virheestä Kicad-ohjelmistolla luoduissa osamäärittelyissä.

Puutteet korjattiin kiertämällä ne väliaikaisesti. Virtaliittimen sijaan kontakteihin juotettiin johdot käyttövirran testauskytkentää varten. Säädettävän vastuksen taivutettiin sivulle ja komponentti juotettiin paikalleen pintaliitoksena.

Käyttövirraksi prototyyppilaitteelle valittiin neljän kennon litium-polymeeriakku, sillä sellainen oli valmiiksi saatavilla.

3.3 Kisko ja anturit

Kiskon ja anturien valmistusmetodi oli tässä vaiheessa vielä päättämättä. Parhaimmalla jäljellä nämä olisi saatu toteutettua, mikäli ne myös olisi tilattu ulkomailta piirilevyvalmistajalta. Projektin rahoitusrajoitteiden takia kuitenkin päätin olla tekemättä näin. Kiskon ja anturien toteutukseen kehitin kaksi erilaista lähestymistapaa, joista molemmat ovat selitetty tarkemmin alla.

3.3.1 Toner transfer -metodi

Toner transfer -metodia käytetään omien piirilevyjen syövytykseen. Tässä lähestymistavassa tulostetaan laser-tulostimella peilikuva halutusta piirilevystä kiiltävälle paperille. Paperi asetetaan piirilevymateriaalin päälle mustepuoli alaspäin ja

sitä lämmitetään silitysraudalla. Laser-tulostuksessa toimiva muovipohjainen muste sulaa uudestaan lämmön seurauksena ja tarttuu tiukasti piirilevymateriaaliin kiinni.

Tämän jälkeen piirilevyä ja siinä kiinni olevaa paperia hinkataan juoksevan lämpimän veden alla, kunnes kaikki paperi on saatu irrotettua piirilevystä. Mikäli kaikki työvaiheet ovat toistettu onnistuneesti, on nyt piirilevyllä näkyvissä halutuissa kohdissa vain paljasta kuparilevyä ja laser-tulostimen mustetta. [10.]

Valmisteltu piirilevy asetetaan lämmitettyyn ferrikloridiseokseen, jolla paljas kupari syövytetään pois piirilevystä. Ferrikloridi on yleinen ja helposti saatavilla oleva piirilevyjen syövyttämiseen tarkoitettu aine.

Ongelmia tässä valmistusmenetelmässä tuli vastaan useita. Tuttavapiiristä löytyi etsinnän jälkeen viimein yksi laser-tulostin, jota pystyi käyttämään tätä tarkoitusta varten. Valittu valokuvapaperi ei kuitenkaan tuntunut toimivan hyvin tämän tulostimen kanssa, minkä seurauksena tulostusjälki oli epätarkkaa ja muste tuntui tarttuvan herkästi tulostamisen jälkeenkin. Muutaman paperin tulostaminen kuitenkin onnistui riittävän hyvin piirilevyn syövytyksen testaamiseksi.

Tulostettua piirilevyn kuvaa ei myöskään saatu myöskään käytettävissä olevien yritysmäärien puitteissa siirtymään onnistuneesti piirilevyille. Tämän metodin todettiin toimivan pääsääntöisesti vain pienille ja yksinkertaisille levyille, jonka jälkeen siirryttiin seuraavaan metodiin projektin etenemiseksi.

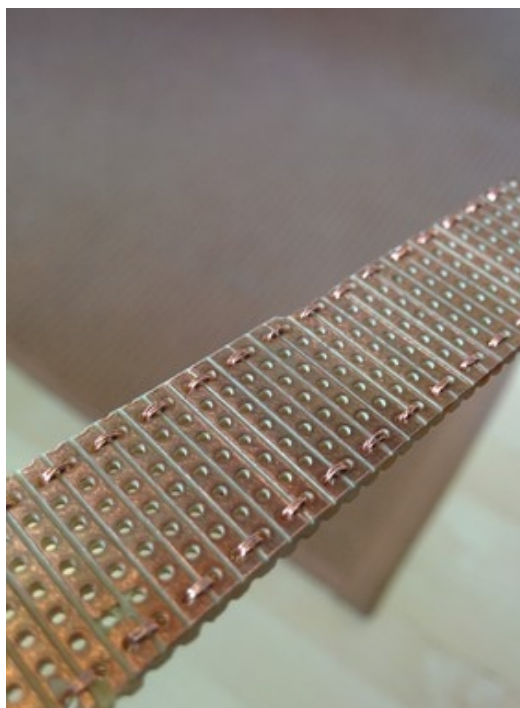
3.3.2 Veroboard -metodi

Toner transfer -metodin epäonnistuessa muutettiin kiskon piirilevyn valmistuksen lähestymistapaa. Pohdinnan seurauksena selvisi, että veroboardista tehdyllä kiskolla ja anturilla voitaisiin päästä hyviin mittaustuloksiin. Koska yleisten elektroniikan komponenttien pinnien väli on hyvin tarkkaan määritelty, täytyy teollisten veroboard-piirilevyjenkin olla mittatarkkoja osia. Veroboardista pystyy myös hyvin helposti toteuttamaan halutun siksak-kuvion siltaamalla samansuuntaisten kiskojen päädyt vaihtelevasti toisiinsa (kuva 1 ja kuva 13).

Rajoitteeksi veroboardin käyttämisessä kuitenkin muodostui anturit #2 ja #4. Näiden anturien tulisi olla suunnitelmien mukaan 90 asteen ja 225 asteen vaihesiirrossa ensimmäiseen anturiin nähden. Veroboardin säännöllisen kuvion ansiosta eivät tällaiset kytkennät ole kuitenkaan mahdollisia. Anturin #3 180 asteen vaihesiirto ja anturin #5

360 asteen vaihesiirto onnistuu säännöllisellä kuviolla ilman ongelmia. Projektin aikataulutuksen ansiosta ei kuitenkaan ollut riittävästi aikaa tilata valmistajalta anturilevyä, jolla olisi mahdollista toteuttaa kaikki esitetyt vaihesiirrot. Anturit kytkettiin vain anturikytkentöihin #1, #3 ja #5 ongelman ratkaisemiksi.

Kun mittausdataa on antureista voitu nauhoittaa tietokoneelle, pystyy teoreettisten antureiden #2 ja #4 mittausdatan simuloimaan ongelmitta. Simulointi tulee olemaan tarpeeksi tarkkaa prototyypin toiminnan varmistamista varten, sillä kyse on vain vaihesiirrosta, eikä sen monimutkaisemmista vaikutuksista. Tällä kokonaisella datalla voidaan sitten jatkossa simuloida myös erilaisia lähestymistapoja paikan laskentaan anturidatasta.



Kuva 13: Monisäikeisellä kuparijuhdolla sillattu Veroboard-kisko ennen juottamista.

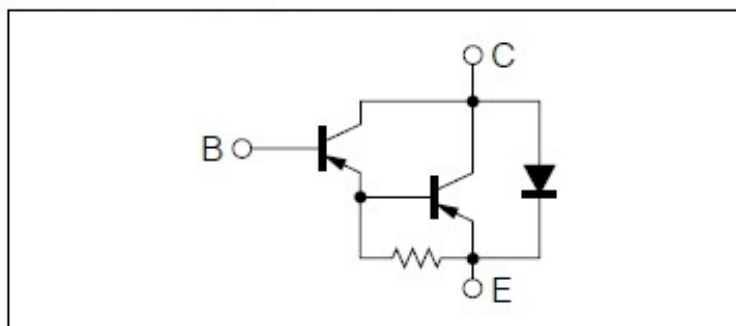
3.4 Laitteiston testaus

Laitteiston testaus aloitettiin sähköisellä koestuksella siten, että laitteistoon kytkettiin käyttöjännite ilman Teensy -mikrokontrolleria. Laitteiston lämpötilaa seurattiin infrapunalämpötila-anturilla, ja kun ylimääraistä lämpenemistä ei huomattu, mitattiin yleismittarilla piirin jännitelähteiden ulostulojännitteet. Sekä 5 V:n jännitelähteen että säädettävän jännitelähteen todettiin toimivan halutulla tavalla.

Seuraavaksi Teensy 3.2 -mikrokontrolleri kytkettiin järjestelmään ja sekä lämpötila että käyttöjännitetestaus suoritettiin. Tämän testauksen jälkeen kiskon kytkennän tilalle kytkettiin vastus kiskon ohjauksen ja säädettävän jännitelähteen testaamiseksi. Tämän testin aikana huomattiin säädettävän jännitelähteen lämpenevän huomattavasti, eikä virran pulssittamisen pulssin pituus vaikuttanut lämpenemiseen. Pulssiohjaimen B950A darlington-transistorin teknisen dokumentaation lähemmässä tarkastelussa huomattiin pinnien 2 ja 3 olevan väärin päin piirilevyssä (kuva 14). Tämä kytkentä aiheutti oikosulun B950A-transistorin sisäisen diodin kautta, lämmittäen jännitelähdettä suuren, lähes oikosulkutasoa vastaavan, virran ansiosta. Lisäksi huomattiin B950A darlington-transistoriparin olevan PNP-tyyppinen [11, s. 1]. Tämä aiheuttaa suuren ongelman piirilevytoteutuksessa, sillä PNP-transistorit ovat tarkoitettu kytkemään kuorman positiivista jännitettä. Suunnitellussa piirilevyssä (liite 1) kuitenkin kytketään kiskon maakytkentää, johon vaaditaan NPN-tyyppinen transistori.

Ostetuista ylimääräisistä osista löytyi kuitenkin toinenkin darlington-transistori, 2SD1276A. Kyseinen transistori on NPN-tyyppinen, joten se juotettiin B950A transistorin tilalle ja todettiin toimivaksi. (12, s. 1)

Internal Connection



Kuva 14: B950A Darlington transistorin sisäinen kytkentäkaavio.

Anturien testaamiseksi Teensy 3.2 -mikrokontrollerille ladattiin yksinkertainen ohjelmisto (liite 5). Ohjelmiston tarkoituksena on pulssittaa kiskoa tasaisella taajuudella ja lisäksi mitata antureille tuleva jännite. Tämä jännitetieto lähetetään USB-väylän yli tietokoneelle analysoitavaksi.

3.5 Mittaustulokset

Laitteiston valmistuttua testausta varten aloitettiin yksinkertaisilla testeillä. Kiskon pulssituksen toiminta varmistettiin vaihtelemalla jännitteensäädön asetusarvoa välillä 1,2 – 11 V, vaihtelemalla pulssitustaajuutta välillä 100 Hz -- 10 kHz, sekä säätämällä pulssituksen pulssin pituutta 2 ja 10 %:n välillä. Testien tulokset mitattiin yleismittarilla, jonka avulla todettiin säätöjen toimivan halutulla tavalla. Suurimmilla jännitteillä, taajuuksilla ja pulssin pituuksilla todettiin laitteistossa huomattavaa lämpenemistä.

Anturielementtien toimintaa testattiin syöttämällä sähköä johdon avulla anturielementtiin. Tällä menetelmällä saatiin muodostettua laitteistolle selkeä signaali, joka mittaantui hyvin Teensy 3.2:n ADC-muuntimissa. Testin tarkoituksena oli todistaa, että mikäli anturielementtiin indusoituu jännitettä, se mitataan oikein testilaitteistossa. Ongelmia anturielementtien toiminnassa ei havaittu.

Edeltävien testausten jälkeen laitteisto asetettiin pulssittamaan kiskoa matalimmalla, 1,2 V:n, jänniteasetuksella ja 1 kHz:n taajuudella. Pulssin pituusasetuksena käytettiin alustavasti 4 %:n asetusta. Asetusten jälkeen anturielementit asetettiin kiskon päälle ja sisääntulevat signaalit visualisoitiin tietokoneella Arduinon Serial Monitor -ikkunassa. Perusasetuksilla ei havaittu indusoitua jännitettä ollenkaan, minkä seurauksena nostettiin jänniteasetusta välillä mitaten maksimiin. Edes 11 V:n asetuksella ei huomattu indusoituvaa jännitettä. Maksimissaan 11 voltin jännite aiheutti testikiskon läpi hieman alle 3 ampeerin virran. Myöskään pulssin pituuden tai taajuuden muutkson ei havaittu vaikuttavan indusoituneeseen jännitteeseen.

Suunniteltuja jatkokokeita vaihesiirtojen ja automaattisen kiskon tunnistamisen suhteen ei toteutettu, sillä testilaitteistolta ei saatu mittaustietoa edes yksinkertaisimmissa tilanteissa. Mittaustieto voitaisiin mahdollisesti saada esille lisäämällä testilaitteistoon anturielementeille vahvistimet, tai käyttämällä isompia antureita keskinäisinduktanssin parantamiseksi. Nämä jatkokehitystoimet eivät ole kuitenkaan tämän kehitysprojektin laajuuteen sisältyviä.

4 Johtopäätökset

Toteutetut testit todistavat, ettei ilman vahvistimia kahden 40 mm pitkän piirilevyjohtimen välille muodostu tarpeeksi suurta keskinäisinduktanssia mitattavan jännitetiedon aikaansaamiseksi. Toteutettu testilaitteisto toimi pienten korjaustoimenpiteiden jälkeen halutulla tavalla, mutta mitattavaa induktiota ei pystytty toteuttamaan tällä kokoonpanolla. Projektin vaatimukset täyttyivät onnistuneen testilaitteiston ansiosta.

Kiskon läpi kulkevan sähkövirran pulssitusta kokeiltiin useilla eri taajuuksilla 100 Hz:n ja 10 kHz:n välillä. Kiskon jännitteensäätöä käytettiin onnistuneesti 1,2 – 11 V välillä. Lisäksi kiskon pulssituksen pulssin pituutta vaihdeltiin 2 – 10 %:n välillä. Suurilla jännitteillä, taajuuksilla ja pulssin pituuksilla tapahtui säädettävässä jännitelähteessä sekä kiskon pulssiohjaimessa huomattavaa lämpenemistä estäen pitkäaikaisen testauksen.

Anturien toiminta koestettiin syöttämällä yhteen anturielementtiin jännitettä fyysisesti sähköjohdolla. Tällä tavalla tuotettu signaali näkyi testiohjelmistossa selkeästi, 1,2 V:n signaalin tuottaessa noin 50 %:n signaalinvoimakkuuden. Ilman anturielementille syötettävää signaalia huomasin laitteen signaali-kohinasuhteen olevan erittäin hyvä vaaditulle tarkkuudelle. 8-bitin ADC-muunnoksen tarkkuudella mitatun nollasignaalin arvo oli vakio, eikä kohinaa ollut havaittavissa yhdenkään bitin vertaa. Käytännön testeissä kiskon pulssituksen yhteydessä ei havaittu indusoitunutta signaalia yhdessäkään anturielementissä millään kiskon pulssitusasetuksella.

Edeltävien tulosten perusteella voidaan sanoa projektin kokeellista lähestymistapaa onnistuneeksi. Induktanssi on monimutkainen aihe laskettavaksi ilman käytännön tietoa. Tässä dokumentissa mainitut testit on myös mahdollista toteuttaa nopeammin ilman testilaitteistoa funktiogeneraattorilla ja oskilloskoopilla. Harmillisesti näitä työkaluja ei ollut käytössä projektin kehityksen aikana. Testilaitteiston sähkö- ja piirisuunnittelu todistettiin kokeellisesti toimivaksi kokonaisuudeksi.

Projektin lopputuloksen perusteella voidaan sanoa vastaavalla tavalla toteutettavaa induktiivista paikkamittausta epäkäytännölliseksi. Mikäli mittaus halutaan tehdä

sähkömagneettisesta kentästä, suosittelen käyttämään hall-antureita riittävän tarkkuuden aikaan saamiseksi.

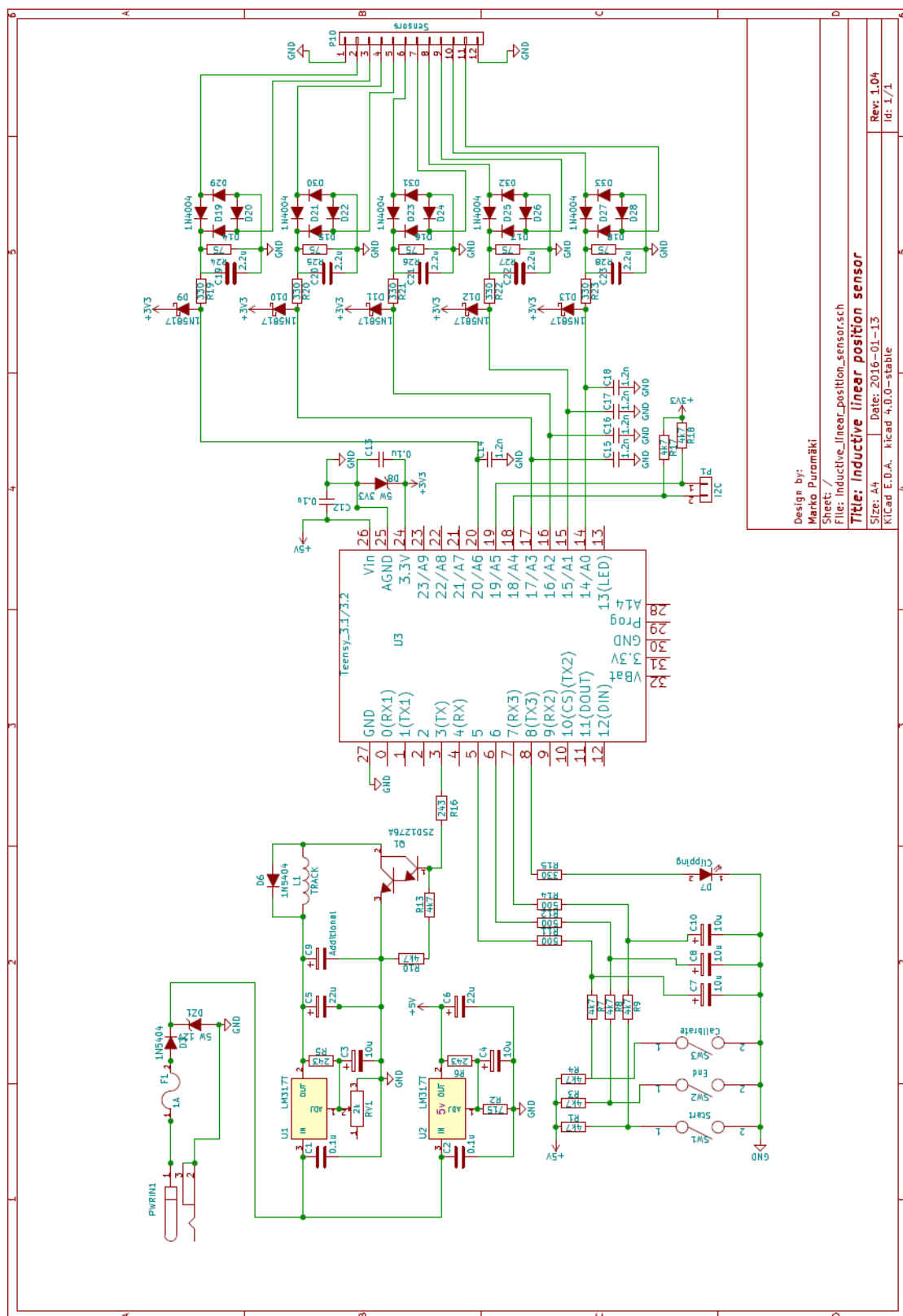
Harrastelijaprojekteja varten käytettävät lineaariset paikkamittaukset kannattaa toteuttaa optisella mittauksella. Optiseen mittaukseen tarvittavat komponentit, LED-valonlähteet ja LDR-valovastukset ovat erittäin halpoja ja helppoja käyttää. Lisäksi mitattava kisko voidaan nopeasti, halvalla ja mittatarkasti valmistaa mattapaperille perinteisellä mustetulostimella. Hyödyntäen nykyäikaista piirilevyvalmistusteknologiaa voidaan valonlähteet ja -vastukset asettaa mittatarkasti piirilevyille, jolloin voidaan muodostaa helposti tarkka monibittinen muuttuvavaiheinen mittaus tulostetusta kiskon kuviosta.

Lähteet

1. Jon Brodtkin, Arstechnica. 24.04.2014. Tech giants, chastened by Heartbleed, finally agree to fund OpenSSL. Verkkodokumentti <<http://arstechnica.com/information-technology/2014/04/tech-giants-chastened-by-heartbleed-finally-agree-to-fund-openssl/>> Luettu 05.03.2016.
2. Macrosensors, Connectivity Ltd. LVDT Basics. Verkkodokumentti <http://www.macrosensors.com/lvdt_tutorial.html> Luettu 07.03.2016.
3. Movetec Oy, ASM GmbH. 11.2004. POSIMAG: Magnetic Scale Position Sensors. Verkkodokumentti <<http://www.movetec.fi/images/pdf/ASM-magneettinauha-anturit.pdf>> Luettu 07.03.2016.
4. SIKO GmbH. The right sensors for every application. Verkkodokumentti <https://www.siko-global.com/adbimage/27311/asset_original/vergleich-optischer-magnetischer-laengen-winkelmeßsysteme.pdf> Luettu 10.03.2016.
5. Tresna. 2012. How do digital calipers work? Verkkodokumentti <http://www.tresnainstrument.com/how_do_digital_calipers_work.html> Luettu 20.04.2016.
6. ST Microelectronics. 12.03.2014. LM217, LM317 Datasheet. Verkkodokumentti <<http://www2.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/group1/a0/db/e6/9b/6f/9c/45/7b/CD00000455/files/CD00000455.pdf/jcr:content/translations/en.CD00000455.pdf>> Luettu 01.02.2016.
7. Paul Stoffregen. 11.12.2012. Teensy 3.0 resistors and DC current per I/O pin. Verkkodokumentti <<https://forum.pjrc.com/threads/5455-Teensy-3-0-resistors-and-DC-current-per-I-O-pin?p=7083&viewfull=1#post7083>> Luettu 15.03.2016.
8. Jack G. Ganssle, The Ganssle Group. Kesäkuu 2008. A guide to debouncing. Verkkodokumentti <<http://www.eng.utah.edu/~cs5780/debouncing.pdf>> 15.03.2016.
9. NXP Semiconductors. 11.2012. K20 Sub-Family. K20P64M72SF1. Verkkodokumentti <http://cache.freescale.com/files/32bit/doc/data_sheet/K20P64M72SF1.pdf> Luettu 04.02.2016.

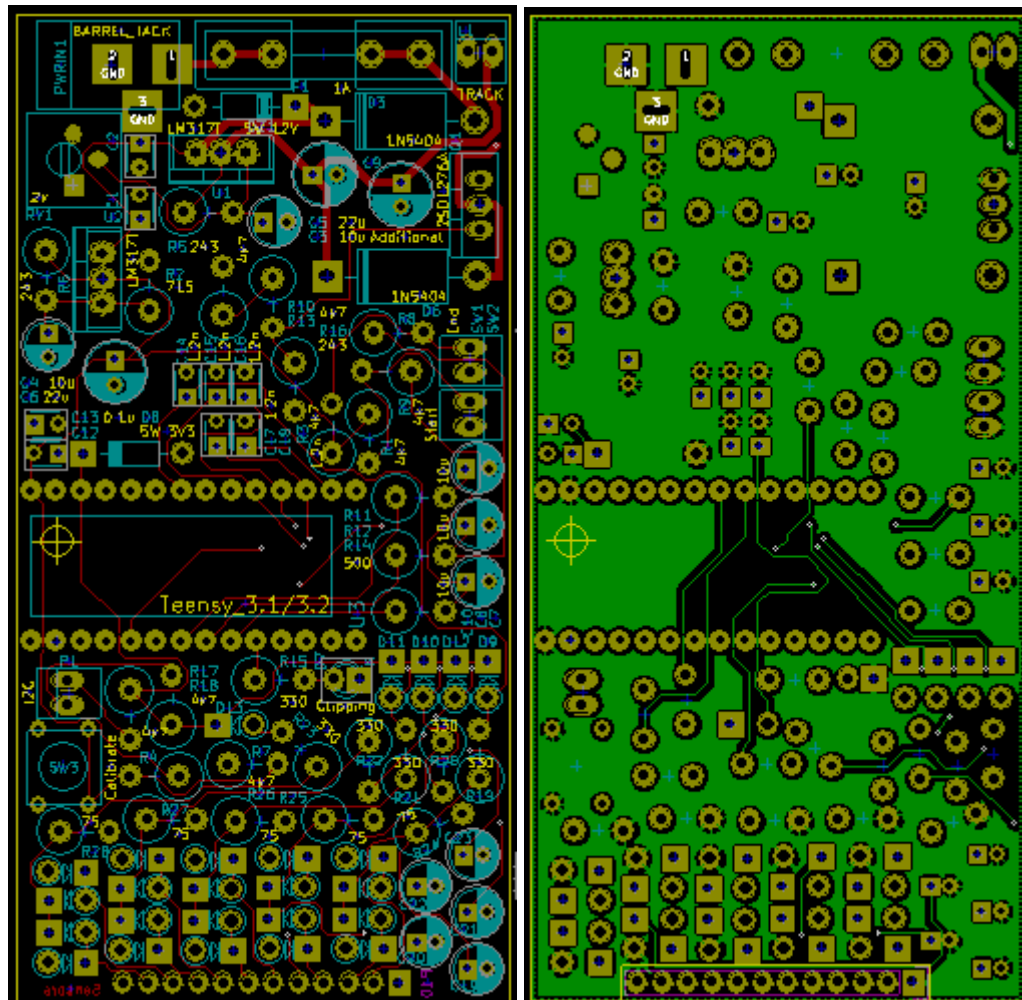
10. Robot Platform, Make. 2004. PCB Etching using toner transfer method. Verkkodokumentti <<http://makezine.com/projects/pcb-etching-using-toner-transfer-method/>> Luettu 03.05.2016.
11. Panasonic, Datasheetpdf. 2014. 2SB950, 2SB950A Technical documentation. Verkkodokumentti <<http://www.datasheetpdf.com/PDF/B950A/845790/1>> Luettu 06.04.2016.
12. Panasonic, Datasheetcatalog. 2016. 2SD1276, 2SD1276A Technical documentation. Verkkodokumentti <<http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/panasonic/SJD00190BED.pdf>> Luettu 06.04.2016.

Anturijärjestelmän sähkökaavio

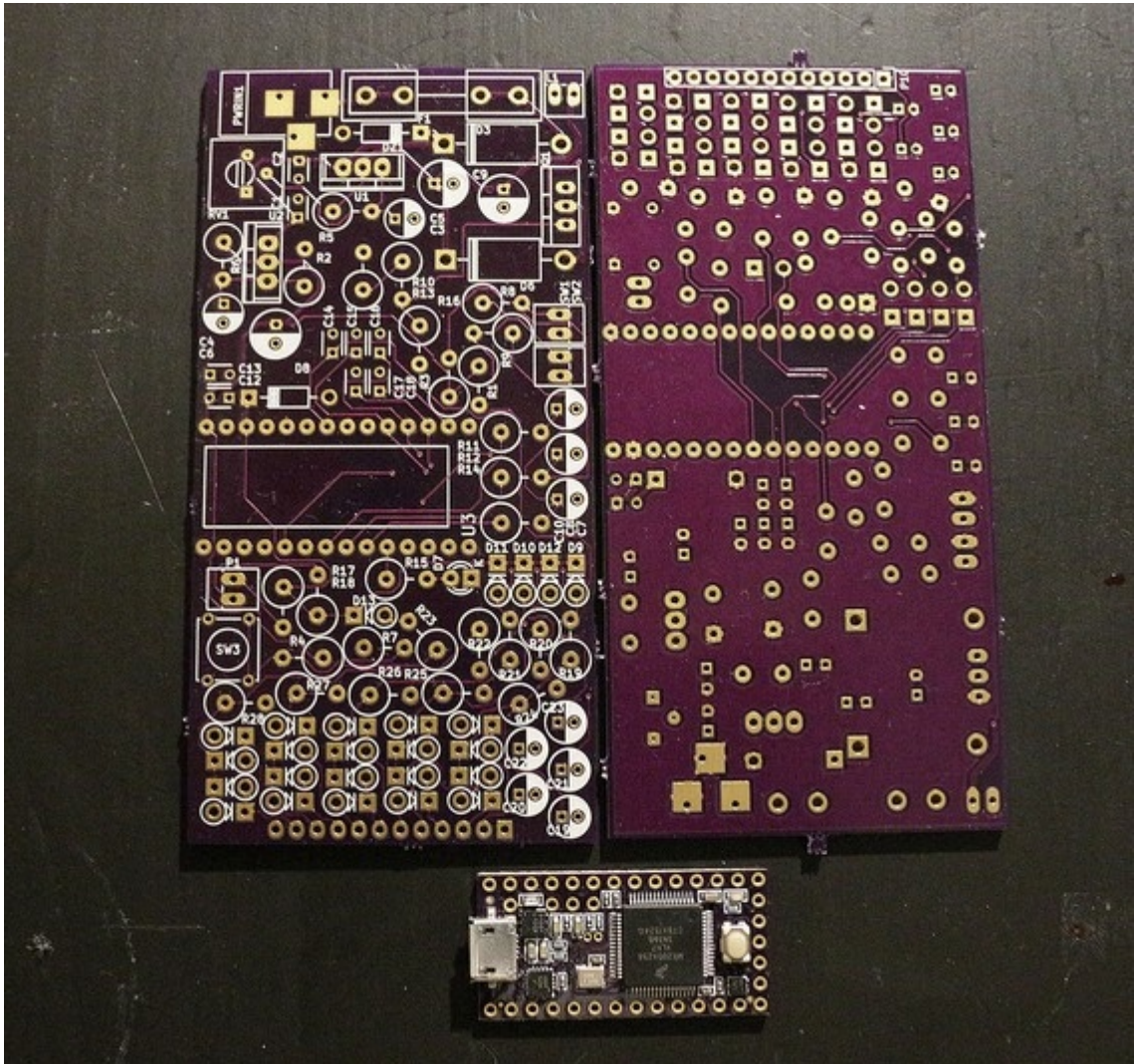


Anturijärjestelmän piirikuvaranto

Vasemmassa kuvassa näkyy toteutuneen anturilevyn etupuoli, oikealla takapuoli.



Anturilevyn kuvat



Useampi anturilevy ja yksittäinen Teensy 3.2 mikrokontrolleri tehtaalta saapuneena.



Yksi anturiyksikkö kasattuna. Kuvassa näkyy vasemmalla ongelmaksi muodostuneet kohdat virtaliitännälle ja säädettävälle vastukselle.



Anturiyksikkö valmiina. Virransyötön ja säädettävän vastuksen ongelmat ratkaistu. Kuvassa näkyy myös anturilevy ja kisko.

Anturijärjestelmän osaluettelo

Lipos Bill of Materials:						
Osa	Nimi	Määrä	Ostetaan	Hinta	Yht	
PWRIN1	DCR25P	1	2	0.60 €	1.20 €	
F1	SULPID 520P2	1	2	0.27 €	0.54 €	
C1, C2, C12, C13	KERKO 100N 50V	4	5	0.06 €	0.30 €	
C3, C4, C7-C10	ELKO105 10U 63V	5	5	0.20 €	1.00 €	
C5, C6	ELKO105 22U 63V	2	5	0.22 €	1.10 €	
C14-C18	KERKO 1N2 50V	5	5	0.06 €	0.30 €	
C19-C23	LE 2U2 50V	5	5	0.20 €	1.00 €	
D3, D6	1N5404	2	5	0.16 €	0.80 €	
D8	ZENER 5W 3V3	1	2	0.60 €	1.20 €	
D9-D13	1N5817	5	5	0.27 €	1.35 €	
D14-D33	1N4004	20	20	0.05 €	1.00 €	
D7	LED 3P	1	5	0.15 €	0.75 €	
Dz1	ZENER 5W 12V	1	2	0.60 €	1.20 €	
L1, P1, SW1, SW2	S-MSD 2	4	5	0.72 €	3.60 €	
P10	PR 1X40 U	2	2	0.62 €	1.24 €	
Q1	2SB950A / 2SD1276A	1	1	3.10 €	3.10 €	
U1, U2	LM317T	2	3	1.12 €	3.36 €	
SW3	SKH PP1	1	5	0.43 €	2.15 €	
RV1	TRIM VAAKA 2K	1	2	0.87 €	1.74 €	
R1, R3, R4, R7-R10, R13, R17, R18	VASTUS 06W 4K7	11	15	0.10 €	1.50 €	
R2	Vastus xW 715	1	5	0.20 €	1.00 €	
R11, R12, R14	VASTUS 06W 499R	3	5	0.20 €	1.00 €	
R15, R19-R23	VASTUS 06W 330R	6	10	0.20 €	2.00 €	
R5, R6, R16	VASTUS 06W 243R	3	5	0.20 €	1.00 €	
R24-R28	VASTUS 06W 75R	5	5	0.20 €	1.00 €	
Yhteensä:					34.43 €	
Antureihin Kuparilevy	KL LC2 3	1	1	9.67 €	9.67 €	
Piikkirima, naaras	PR 1X36 N BL36	2	2	2.91 €	5.82 €	
Sulake 5x20mm 1A	SUE 1A H	1	5	0.37 €	1.85 €	
Yhteensä:					51.77 €	

Teensy 3.2 -testiohjelmisto

Arduino 1.6.8 kehitysympäristö ja Teensyloader 1.28.

```
int led = 13;
int track = 3;
int clipled = 8;

int sens1pin = 14;
int sens3pin = 16;
int sens5pin = 20;

int blinksteplimit = 10;
int blinkstep    = 1;

int sens1value;
int sens3value;
int sens5value;

elapsedMicros Timestamp;

void setup() {
  // initialize the digital pin as an output.
  pinMode(led, OUTPUT);
  pinMode(track, OUTPUT);
  pinMode(clipled, OUTPUT);

  pinMode(sens1pin, INPUT);
  pinMode(sens3pin, INPUT);
  pinMode(sens5pin, INPUT);

  Serial.begin(38400);          //Use USB serial
  analogWriteFrequency(track, 1000); //Set PWM frequency to 1 kHz
  Serial.println("STARTING....");
  delay(1000);
}
```

```
void loop() {  
  //Pulse track at 1 kHz, 2% duty cycle.  
  analogWrite(track, 8);  
  //digitalWrite(clipled, HIGH);  
  
  //Read sensor information  
  sens1value = analogRead(sens1pin);  
  sens3value = analogRead(sens3pin);  
  sens5value = analogRead(sens5pin);  
  
  //Send sensor values over USB  
  if(sens1value > 1 or sens3value > 1 or sens5value > 1){  
    Serial.print(Timestamp); Serial.print("\t\t");  
    Serial.print(sens1value); Serial.print("\t\t");  
    Serial.print(sens3value); Serial.print("\t\t");  
    Serial.print(sens5value); Serial.println("\t\t");  
  }  
  
  //Blink leds  
  //Clipping warning  
  if(sens1value > 225 or sens3value > 225 or sens5value > 225){  
    digitalWrite(clipled, HIGH);  
  } else {  
    digitalWrite(clipled, LOW);  
  }  
  
  //Blink 13  
  if(blinkstep == 10 or blinkstep == 9){  
    digitalWrite(led, HIGH);  
  } else {  
    digitalWrite(led, LOW);  
  }  
  
  blinkstep = blinkstep + 1;  
  if(blinkstep > 10){  
    blinkstep = 1;  
  }  
  
  //Loop 40 times a second  
  delay(25);  
}
```